

산불 지표화의 1차원 화염전파 모델의 수치해석 연구
-평지조건 기반에서-

A Numerical Study of 1-D Surface Flame Spread Model
-Based on a Flatland Conditions-

김동현[†] · 田中哮義* · 樋本圭佑* · 이명보 · 김광일**

Dong-Hyun Kim[†] · Takeyoshi Tanaka* · Keisuke Himoto* ·
Myung-Bo Lee* · Kwang-Il Kim**

국립산림과학원 산불연구과, *Disaster Prevention Research Institute Kyoto University,
**인제대학교 보건안전공학과
(2008. 1. 28. 접수/2008. 3. 21. 채택)

요 약

산불의 확산특성은 일반적으로 가연물의 특성, 지형, 바람조건과 같은 기상 상태등과 관련이 있다. 산불의 발달과정에 있어 수치해석을 통한 확산예측 모델은 열전달 과정에 기본을 둔 열에너지 전달에 대한 해석이 가장 일반적인 방법론이다. 산불의 발생시 열에너지의 전파속도를 해석하는 것은 화염의 생성과 열전달, 그리고 소멸에 이르는 전 과정에 대한 물리적, 화학적 해석을 통해 화염의 이동에 따른 전파속도로 추정할 수 있다. 본 논문에서는 고체연소물질의 표면화염전파에 대한 수치해석을 통해 1차원 지표화 확산 모델식을 제시하였다. 1차원 확산모델식은 평지상태에서 풍속조건에 따른 화염의 전파속도 산정식으로써 지표연료의 화염유지시간, 화염의 높이, 화염의 온도, 지표연료의 착화온도 등에 대한 실험 및 이론식을 적용하였다. 실험값 및 다른 모델식과의 ROS 비교 결과, 풍속 3 m/s 이하의 조건에서는 지수함수식의 증가곡선을 나타내는 경향을 보였다. 침엽수종인 소나무 낙엽에 대한 수치해석값과 실험값을 비교한 결과, 풍속 1-2 m/s 조건에서는 확산속도가 약 10% 상향예측이 되었고 풍속 3 m/s 조건에서는 약 20% 하향예측 되었다. 따라서 앞으로 지표화 확산 예측을 위해 본 연구결과에서 얻어진 화염확산 알고리즘을 이용한 초기 산불확산 예측 적용이 가능할 것으로 사료된다.

ABSTRACT

The characteristics of the spread of a forest fire are generally related to the attributes of combustibles, geographical features, and meteorological conditions, such as wind conditions. The most common methodology used to create a prediction model for the spread of forest fires, based on the numerical analysis of the development stages of a forest fire, is an analysis of heat energy transmission by the stage of heat transmission. When a forest fire breaks out, the analysis of the transmission velocity of heat energy is quantifiable by the spread velocity of flame movement through a physical and chemical analysis at every stage of the fire development from flame production and heat transmission to its termination. In this study, the formula used for the 1-D surface forest fire behavior prediction model, derived from a numerical analysis of the surface flame spread rate of solid combustibles, is introduced. The formula for the 1-D surface forest fire behavior prediction model is the estimated equation of the flame spread velocity, depending on the condition of wind velocity on the ground. Experimental and theoretical equations on flame duration, flame height, flame temperature, ignition temperature of surface fuels, etc., has been applied to the device of this formula. As a result of a comparison between the ROS(rate of spread) from this formula and ROSs from various equations of other models or experimental values, a trend suggesting an increasing curved line of the exponent function under 3 m/s or less wind velocity condition was identified. As a result of a comparison between experimental values and numerically analyzed values for fallen pine tree leaves, the flame spread velocity reveals a prediction of an approximately 10% upward tendency under wind velocity conditions of 1 to 2 m/s, and of an approximately 20% downward tendency under those of 3 m/s.

Keywords : Forest fire, Surface fire, Flame spread rate, Wind velocity, Rate of spread

[†] E-mail: k3d2h1@forest.go.kr

1. 서 론

산불의 확산특성은 지형(경사, 사면의 향 등), 기상(풍속, 풍향, 상대습도 등), 연료(연료의 형태, 연료습도, 열방출에너지 등)의 산불환경 조건들에 따라 영향을 받는다.^{10,14-16)} 산불확산 알고리즘을 개발하고 모델화하여 산불현장에 적용하기 위해서는 첫째, 산불에 영향을 미치는 고정인자(경사, 사면, 고도 등과 같은 지형인자와 수종, 연료의 분포 등과 같은 연료인자)와 기상과 같이 시간에 따라 변화되는 유동인자를 고려하여야 한다. 둘째는 일반적인 화재확산과 같이 물리화학적 변화들에 대한 고려와 함께 지형(사면향, 경사도)-기상(풍속, 풍향), 기상(상대습도)-연료(연료습도) 등의 상호영향에 대한 실험적, 이론적 고려가 반영되어야 한다. 셋째는 산불확산에 상관되는 변수들의 실험값과 지배방정식의 해석을 통한 산불확산예측 알고리즘을 개발하여야 한다. 마지막으로 수식의 연산처리를 통해 결과값을 GIS상에 표출하여 활용할 수 있는 프로그램개발이 요구되어지고 있다. 이러한 일련의 과정에 대해 전 세계적으로 꾸준한 연구가 수행되고 있다. 특히, 미국농림부 산하 산림청 산불연구소에서는 과거 수십 년간 산불의 화염전파를 예측하기 위해 여러 가지 실질적인 연구를 시행한 바 있다. 가장 일반적으로 산불확산예측을 위해 운영되고 있는 모델들은 실험·관찰에 의해 확산속도 등을 상관관계를 추론함으로써 확산예측 결과를 산정한다.

미국의 BehavePlus, FARSITE, 캐나다의 Forest Service Fire Behavior Prediction System¹⁷⁾과 호주의 Mk 4 MacArthur Fire Danger Meters²³⁾ 그리고 CSIRO Grassland Fire Spread Meter 등은 풍속, 경사, 습도, 연료특성들에 의해 산불확산이 예측되지만 화재에 대한 기상과 연료의 상호작용에 대해 조율하는 것을 배제한 상태에서 Hirsch¹⁷⁾ 및 Nobel *et al.*²³⁾은 야외실험 측정 결과를 통해 Albin¹¹⁾와 Rothermel¹⁶⁾은 실내 실험규모의 단순한 화염확산 실험결과를 통해 확산 예측식을 각각 제시하였다. 특히, 세계적으로 널리 알려져 있는 BehavePlus와 FARSITE 산불확산예측 프로그램은 semi-empirical 기법을 기초로 하여 만들어졌다. 이와 같은 모델들은 외부환경 조건들에 대해 경험적 실내 실험을 근거로 비물리학적 산불확산예측 쉽고 빠르게 적용할 수 있게 만들어 졌다.²⁴⁾ 하지만 이러한 모델들은 내·외부의 열유동 및 기체유동장 변화에 대한 해석이 반영되지 않은 단점을 가지고 있어 앞으로 예측해석 결과의 정확성에 대해 해결해 나가야 할 숙제를 가지고 미국, 프랑스, 포르투갈, 그리스 등 국외 산불연구학자들을 중심으로 지속적인 연구가 수행되고 있다.

이에 본 연구에서는 먼저, 지표연소물질인 낙엽의 연소실험 결과를 토대로 화염의 열전달 수치해석을 통해 1차원 산불 지표화 확산예측 알고리즘을 개발하였다.

2. 이론적 배경

일반적인 산불의 화염전파는 바람이나 지형의 기울기에 따른 복사 열전달 및 대류열에 따라 달라진다. 대부분의 산림연료 상태는 토양층의 지표 바닥면을 따라 상부에 형성된 다공성 연료층(Porous fuel layer)으로 구성되어 있다. 따라서 산불에 대한 화염전파해석은 Figure 1과 같이 고체가연물질에 대한 표면화염전파 해석을 통해 이루어진다. 즉, 전진화염 앞에서 열전달에 의해 초기온도 T_{∞} 인 미연소연료를 발화온도인 T_{ig} 로 가열하는 열에너지를 구하는 방정식을 통해 화염전파를 해석할 수 있다. 정상상태 조건인 경우, 매체의 온도변화 및 엔탈피의 상관 관계식은 식 (1)과 같다.²⁹⁾

$$\rho V \Delta h = \dot{q}'' \tag{1}$$

여기서, $\Delta h = c(T_{ig} - T_{\infty})$ 이다.

화염전파해석에 있어서의 고체연료인 산림연료의 형태는 크게 열적 두께가 얇은 경우와 열적 두께가 두꺼운 경우로 구분되어질 수 있다. 여기서 열적 두께란 고체연료의 물리적 두께 δ 에 따라 바닥면으로부터 열손실 발생여부에 따라 결정된다. 일반적인 지표층의 산림연료는 셀룰로오스로 구성된 낙엽층으로 단위 가연물의 열적 두께가 얇은 다공성 고체연료에 해당된다. 따라서 산불에 있어서 지표층연료의 화염전파속도는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.²⁹⁾

$$V = \frac{\dot{q}''}{\rho c(T_{ig} - T_{\infty})} \tag{2}$$

여기에서 \dot{q}'' 는 복사열전속으로 식 (3)과 같이 Stefan-Boltzmann Constant(σ), 방사율(ϵ) 그리고 가연물질 온

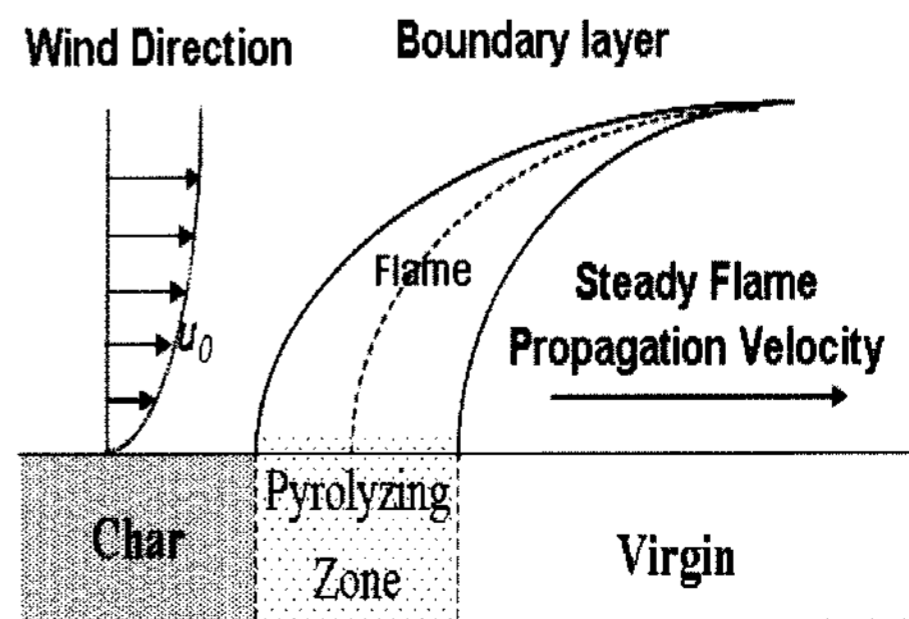


Figure 1. Wind added surface flame spread.

도변화값의 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{q}'' = \epsilon\sigma(T_f^4 - T_\infty^4) \quad (3)$$

2.1 화염의 높이 및 폭

일반적으로 바람이 불지 않는 조건에서의 액체 또는 고체 가연물질의 수평면 화재에 대한 화염높이 산정은 McCaffrey,²⁹⁾ Heskestad³⁰⁾에 의해 식 (4)와 같이 제시되었다. 따라서 본 연구에서도 무풍시 산림 지표면의 주요 가연물질인 낙엽층의 연소시 화염높이 산정을 식 (4)를 적용하였다.

$$H_0 = -1.02D + A\dot{Q}^{2/5} \quad (4)$$

여기서, 계수 A는 표준 대기조건 하에서 일반적인 값 0.235(m · kW^{-2/5})을 적용한다. 이는 가연성 물질에 대해 연소반응시 유입되는 공기의 단위질량 당 방출되는 열 H_c/r이 크게 변화하지 않는 사실과 연관되어 적용한 것으로 일반적인 계수 A의 범위는 0.240~0.226(m · kW^{-2/5})이기 때문이다.

바람이 부는 조건에서의 화염높이 산정은 바람에 의한 화염의 기울기 적용을 통해 화염의 높이를 산정할 수 있다. 이것은 풍속과 중력가속도에 관한 Froude수의 적용을 통해 계산될 수 있다. 바람의 영향으로 인한 화염의 기울기 산정은 Figure 2에 나타난 바와 같이 화염의 중심축과 수평면과의 경사각 ϕ 의 값으로 구할 수 있으며 여기서 바람이 불지 않는 조건에서의 화염높이 H₀는 바람이 부는 조건상태에서는 화염의 길이 값 L과 같다. 따라서 화염의 길이 L은 식 (4)의 H₀ 값을 통해 구할 수 있고 바람조건하에서 발생하는 화염의 경사각 산정을 통해 실제 화염높이(H)를 구할 수 있다.

Albini¹²⁾와 Nelson · Adkins¹⁸⁾는 각각 바람에 대한 화염의 기울기 경사각을 통해 화염높이 산정식을 식 (5), 식 (6)과 같이 제시하였다. 그리고 본 연구에서는 서로 다른 Albini,¹²⁾ Nelson · Adkins¹⁸⁾의 화염높이 계산식들과 실험값을 함께 비교, 평가하기 위해 Putnam²¹⁾이 제

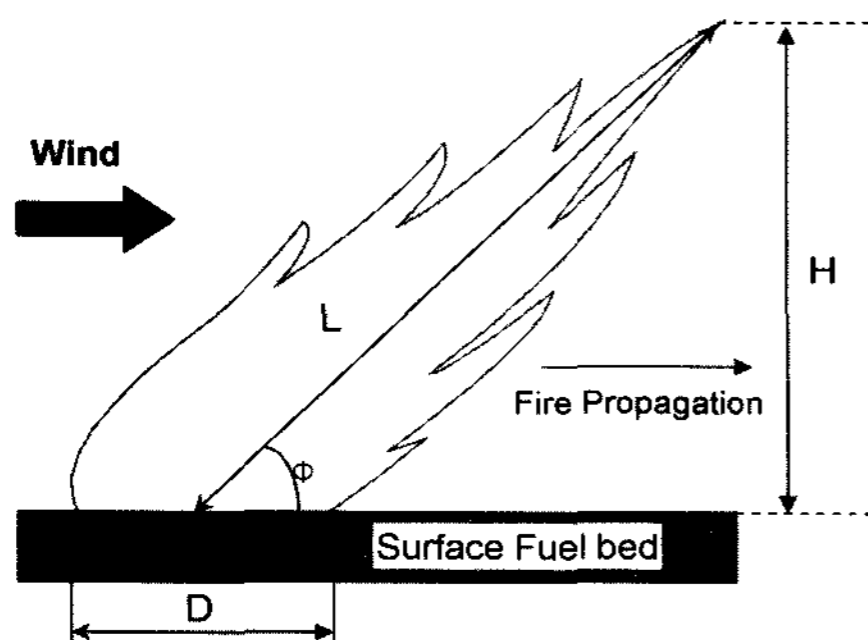


Figure 2. Geometrical characteristics of the flame by wind.

시한 식 (7)을 적용하였다.

$$\tan\phi = 0.8165 Fr_{Albini}^{-0.5} \quad (5)$$

$$\tan\phi = 1.124 Fr_{Nelson}^{-0.29} \quad (6)$$

$$H = H_0(1 + 4Fr_{Putnam})^{-0.5} \quad (7)$$

여기서, $Fr_{Nelson} = Fr_{Albini} = Fr_{Putnam} = u_0^2/gH_0$ 이다.

일반적인 화염의 폭은 산불이 화염의 형태로 확산되어 가는 산불확산 진행방향에서 연소물질의 화염이 소진되는 마지막 소멸지점으로부터 미연소지에 착화되어 화염이 발생하는 화두(fire head) 지점까지의 거리로써 가연물질이 화염의 형태로 연소되는 수평상의 길이를 말한다. 따라서 지표 낙엽층 가연물질에 대한 연소시간(Burnout time)의 실험 측정값과 계산식에 의해 산출된 확산속도(V_{spread} , m/s)의 곱에 의해 식 (8)과 같이 계산될 수 있다. 여기서 화염의 폭은 산불확산속도와 연소시간에 비례하므로 풍속이 강할 경우, 보다 넓은 화선의 폭으로 화재가 전파되는 것을 알 수 있다.

$$D = V_{spread} \times t_{burnout} \quad (8)$$

2.2 화염 열선속

지표화 화염으로부터 미연소지에 대한 화염전파를 해석하기 위해서는 복사 열선속 예측에 대한 계산이 고려되어야 한다. 이는 목표지점에 대한 복사열유속의 계산이 잠재적 위험과 착화의 가능성을 제공해 주기 때문이다. 실제 산불상황에서는 미연소지 화염전파 특성은 연료물질의 종류, 배열상태, 가연물의 양, 기상조건 등에 따라 임의적이고 시간에 따라 변화된다. 따라서 화염의 열유속에 대한 목표지점의 열전달에 의한 온도 변화 값 산정을 위해 형상계수와 방사율을 적용하여 한다.

형상계수(View Factor)는 일반적으로 평면층, 선대칭 원통 및 원추 등과 같은 간단한 기하학적 형상으로 표현할 수 있는데 본 연구에서는 화염으로부터 목표지점에 대한 열선속 계산을 Figure 3과 식 (9)~(11)과 같이 화염지점 A₀에서 A₁, A₂, A₃ 지점의 형상계수 적용을 통해 열선속을 산출하였다.

$$F_1 = F_s + F_a = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{r_a}{\sqrt{h_a^2 + r_a^2}} \right) \quad (9)$$

$$F_2 = F_s - F_b = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{r_b}{\sqrt{h_b^2 + r_b^2}} \right) \quad (10)$$

$$F_3 = F_s - F_c = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{r_c}{\sqrt{h_c^2 + r_c^2}} \right) \quad (11)$$

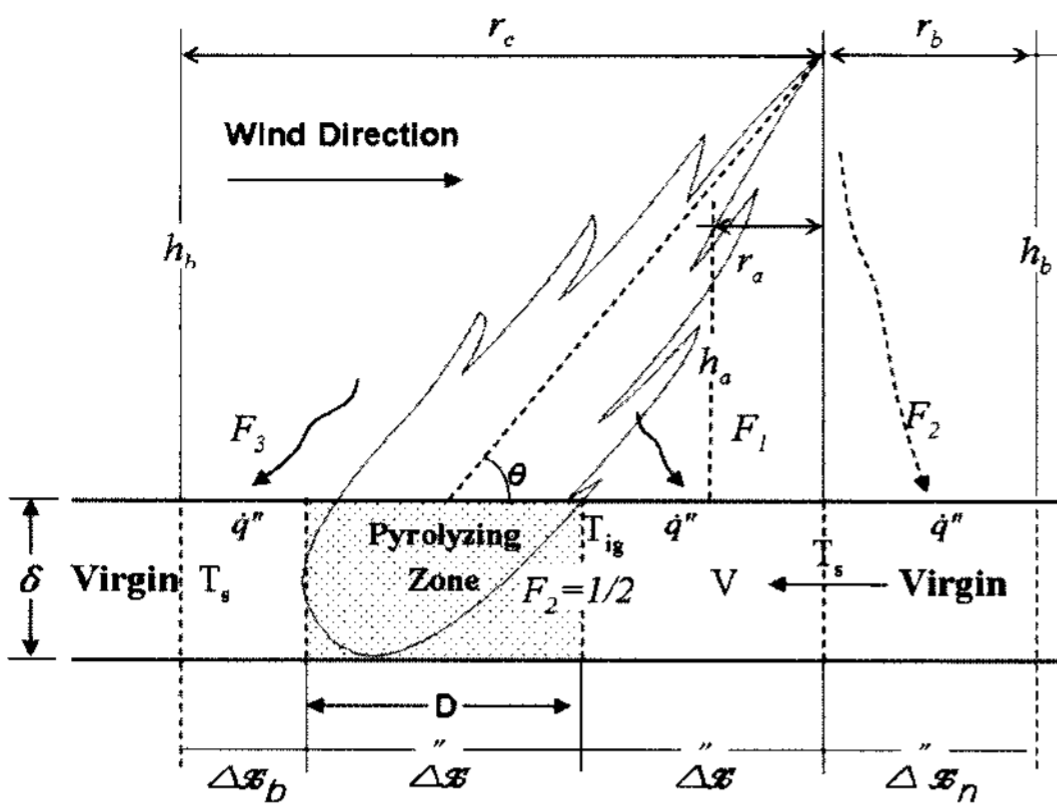


Figure 3. Schematic of heat flux of the 1-Dimensional flame.

또한 화염으로부터 일정거리 이상의 열전속은 열전달에 큰 영향을 미치지 않음을 가정하여 바람순방향에서는 무풍상태의 초기 화염길이에 해당되는 목표지점까지 제어체적의 길이를 반영하였고 전진화염의 반대방향의 경우에는 식 (11)의 형상계수 값을 적용하였다.²⁸⁾ 여기서 화염의 각 목표지점으로 전파되는 파장에 대해 총 열전속은 식 (12)와 같이 표현될 수 있다.

$$\dot{q}'' = \dot{q}''_r \sum_{n=1}^3 F_n \quad (12)$$

2.3 낙엽 착화성

우리나라 산림중 침엽수 및 활엽수의 대표수종인 소나무와 굴참나무의 낙엽에 대한 착화온도는 Table 1과 같이 제시되어진 바 있다.²⁾

여기서 제시되어진 지표층 낙엽연료의 착화온도를 통해 화염으로부터 복사열 전달에 의한 낙엽층의 착화시간(t_{ig})을 계산할 수 있고 가연물질의 착화시간은 두께에 따라 각기 다른 방정식이 적용되나 산불의 지표화에 있어 낙엽 단일 개체의 두께는 2 mm 이하이므로 식 (13)을 적용할 수 있다.²⁸⁾

$$t_{ig} = \rho c l + \frac{T_{ig} - T_{\infty}}{\dot{q}''} \quad (13)$$

Table 1. Ignition temperature of the main surface litter by radiation heat (ISO Flammability Tester 610)

Spec. of tree	Self ignition temp. (°C)	Ignition temp. (°C)	Mc (%)
<i>P. densiflora</i>	348	311	7.2
<i>Q. variabilis</i>	307	305	7.3

Table 2. Parameters for a prediction of 1-D forest surface fire spread (flame spread) rate

Parameters	Value	Parameters	Value
<i>Q</i> (kW/m ²)	139.6	<i>t</i> _{burnout} (sec)	70
ϵ	0.9	<i>T</i> _∞ (°C)	21
ρ (kg/m ³)	25	<i>T</i> _f (°C)	800
<i>c</i> (J/kg°C)	2.3	<i>T</i> _{ig} (°C)	348

열방출률(HRR)는 소나무 낙엽의 최대열방출률 139.6 kW/m²를 적용하였고 방사율은 셀룰로오스 물질의 방사율 범위 0.9~0.95에서 0.9를 적용하였다. 다른 주요 인자들의 적용은 Table 2와 같이 기존 실험값을 적용하였다.⁸⁾

3. 지표화의 1차원 수치해석

3.1 열방출률 적용

산불의 지표화에 대한 낙엽층의 열방출률(HRR)은 가연물질의 유효연소열(ΔH)과 질량손실률(m'')을 통해 식 (14)와 같이 적용할 수 있다. 특히, 유효연소열 및 질량손실율은 ISO 5660(Mass Loss Calorimeter) 시험장치를 이용하여 각각 소나무 낙엽에 대해 실험값을 적용하였다.

$$\dot{Q} = \Delta H m'' \quad (14)$$

3.2 화염전파속도

3.2.1 표면의 화염이동시간 계산

시간경과에 따른 열방출량 해석은 식 (14)에서 시간에 대한 미분을 통해 식 (15)와 같이 나타낼 수 있고 시간경과에 따른 온도변화는 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 시간에 따른 온도변화는 dT/dt = q''/ρcδ, dT/dt = (T_{t+Δt} - T_s)/Δt의 치환에 의해 구해진다.

$$\dot{Q} = \Delta H m'' = \Delta H \frac{dm''}{dt} = \Delta H \frac{d}{dt}(\rho\delta) = \Delta H \rho \frac{d\delta}{dt} \quad (15)$$

$$T_{t+\Delta t} = T_t + \frac{\dot{q}''}{\rho c \delta} \Delta t \quad (16)$$

화염전파속도 V_{Spread}는 식 (2)와 1차원 화염전파해석을 위해 화염으로부터 나오는 열전속 q''에 대한 목표지점의 열전속 형상계수와의 관계식 적용을 통해 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = \frac{\epsilon \sigma (T_f^4 - T_{\infty}^4)}{\rho c (T_{ig} - T_{\infty})} \times F_n \quad (17)$$

4. 결과 및 고찰

1차원 화염전파속도 계산을 위해 2장에서 논의한 이론적 관계식에 대한 수치해석과 실험에 의한 각 변수 값 측정 등을 통해 Figure 4의 시뮬레이션 알고리즘을 개발하였다. 또한 개발된 알고리즘의 수치해석을 위해 컴퓨터 프로그래밍을 통해 1차원 화염확산 예측프로그램을 개발하였다.

프로그램 개발에서는 비주얼베이직 언어를 이용하였고 각 격자에 대한 시간변화에 따른 화염의 복사열전달에 의한 화염전파에 대한 수치해석을 하도록 적용하였다.

본 연구결과로 개발되어진 Figure 4의 알고리즘을 바탕으로 1-D 지표화 화염확산 예측 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 예측적용한 결과, Figure 5와 같이 변수 값 인자들에 대한 결과 값이 나타내어진다.

Figure 5에서 x축은 시간변화이고 y축은 수평면 격자의 길이이다. 시간에 따라 각 수평면 길이가 가지는 온도변화에 대해 선형으로 화염의 온도확산 결과를 표현하였다. 파란실선은 연료 초기설정온도(T_{∞}) 21°C이며 적색에 가까워질수록 화염의 최고온도인 800°C 값을 나타낸다. 따라서 Figure 5에서 보이는 바와 같이,

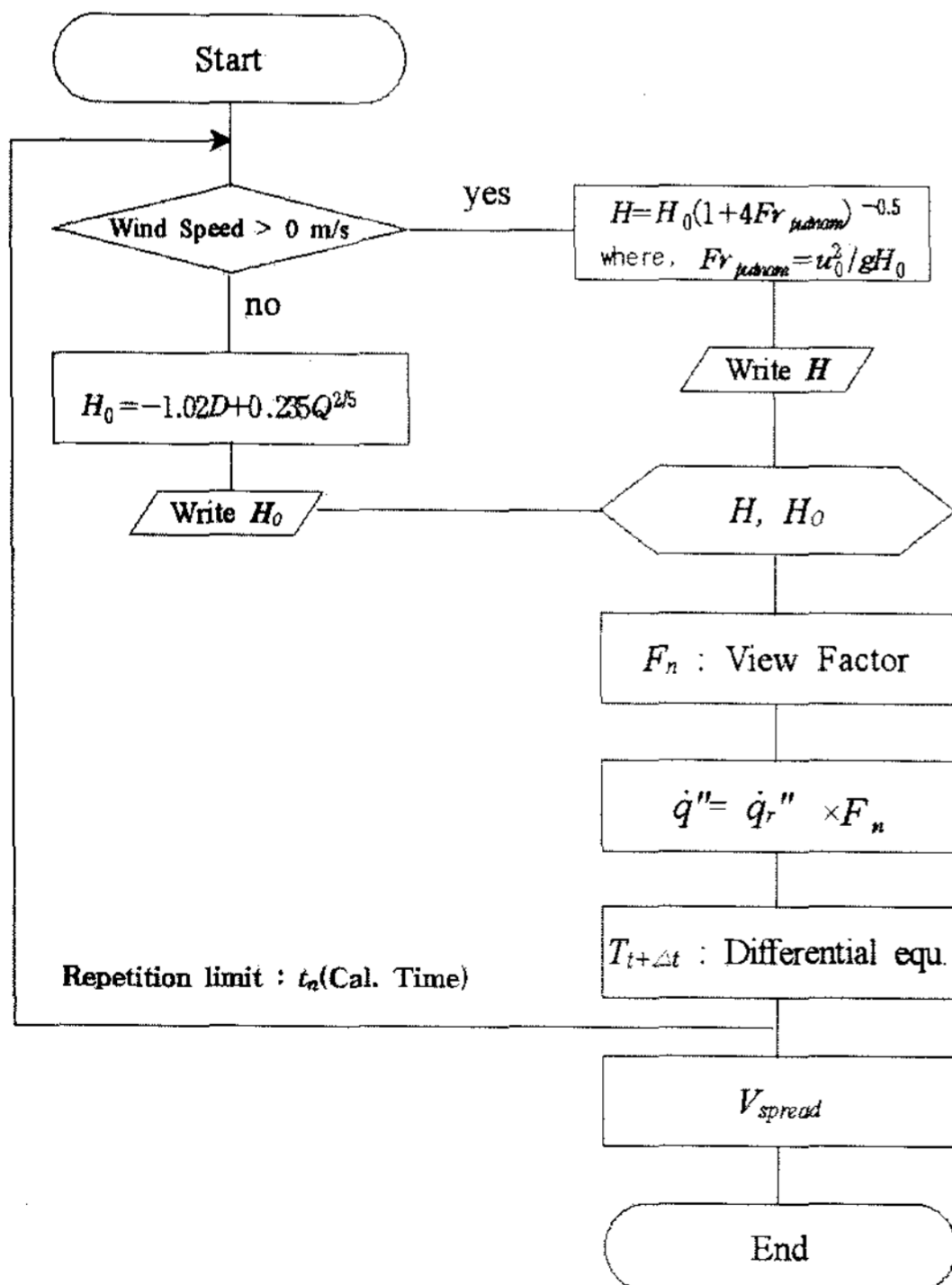


Figure 4. Calculation flow chart for 1-D forest surface fire spread (flame spread) rate numerical analysis.

전파길이(y축)/시간(x축)을 계산하여 ROS 값을 계산한다. 각 풍속별 계산의 결과는 Figure 6에서 보여주는 바와 같다.

기존의 다른 모델식 및 실험값과의 확산속도(ROS, Rate of Spread) 비교 결과는 Figure 6에 나타난 바와 같다. 본 연구에서는 실내 실험실시 풍속 3 m/s 이상의 조건에서 낙엽층 연료의 움직임으로 화염의 열전달에 의한 확산보다는 Rolling fire에 의한 확산형태로 이어져 순수 열전달에 의한 화염전파해석을 위해 Figure 6과 같이 풍속 3 m/s 이하의 조건에서 비교검토가 이루어졌다.

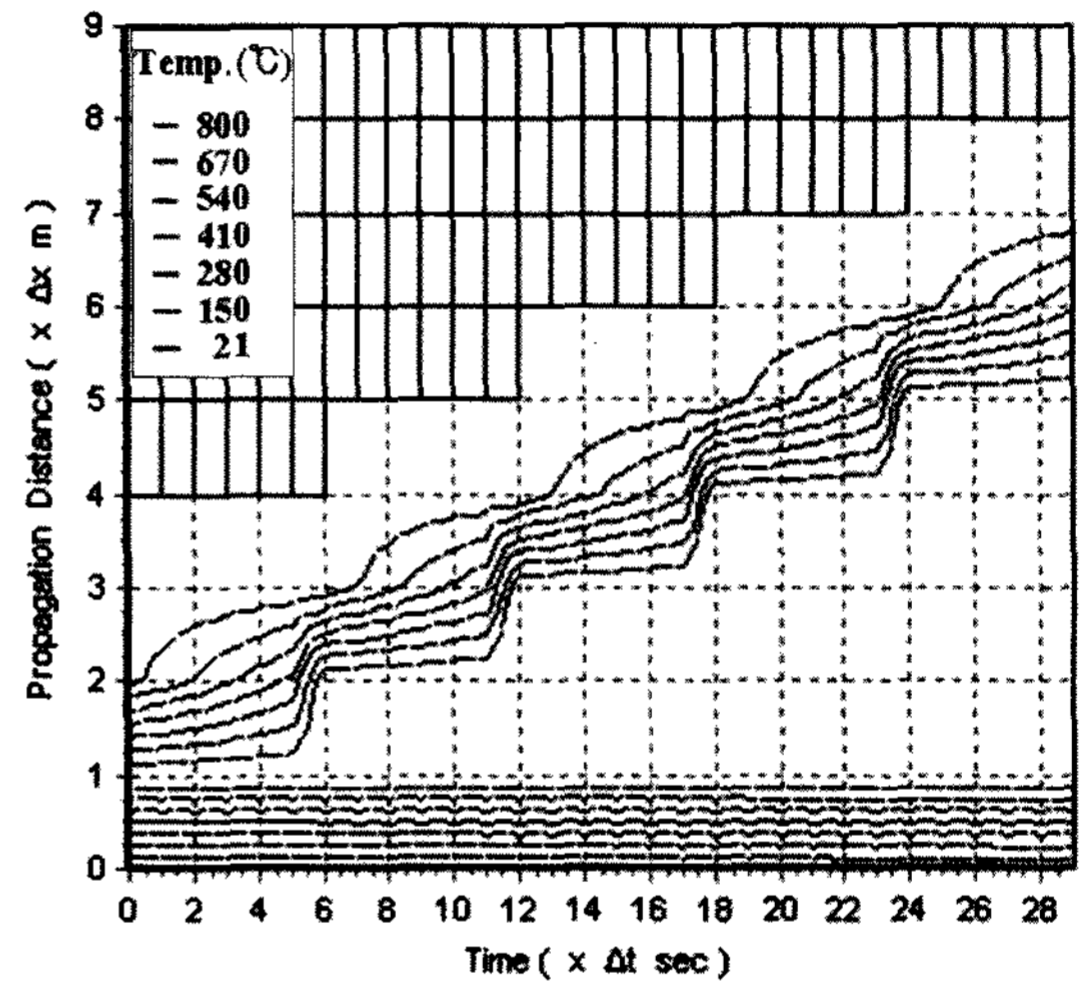


Figure 5. An example of application to 1-D surface flame spread model.

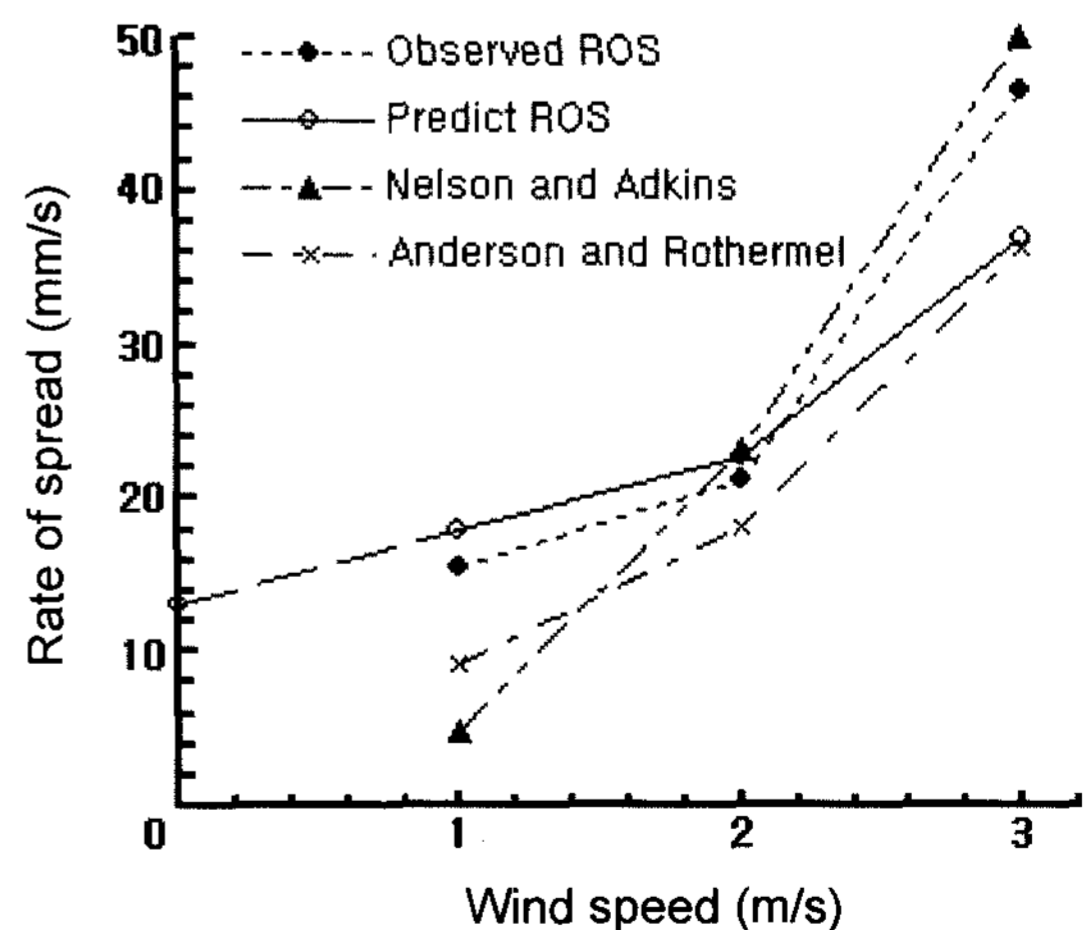


Figure 6. Observed and predicted ROS from this study model and from other laboratory-based models vs. wind speed (*Exp. Condition: Pinus ponderosa needles fuel bed, M_c 10%).

본 연구의 화염전파 수치해석모델과 Nelson and Adkins, Anderson and Rothermel 실험식의 ROS 값의 비교결과, 전체적으로 Figure 6에서 보이는 바와 같이 풍속에 의한 확산속도 증가경향이 유사하게 나타났으며 실험결과 값과 화염전파 수치해석모델의 예측결과 값의 비교결과, 풍속 1~2 m/s에서 약 10% 상향예측 결과치가 나타났고, 풍속 3 m/s에서는 약 20%의 하향 예측 결과치가 나타났다. 실험값과 예측 결과값의 차이는 낙엽의 밀도, 수분함유량, 연기층으로 인한 복사열 전달 장애, 풍속의 균일성, 낙엽층 연료 배열의 균일성 등에 따라 발생할 수 있다. 또한 시뮬레이션적용에서 반영하지 못한 상기 변수들의 영향으로 인해 발생된 오차값으로 사료된다.

5. 결 론

산불의 초기 확산형태는 대부분 지표화로부터 시작되어 수관화, 비화로 확산된다. 산불의 초기 확산속도의 예측은 산불의 초동진화에 있어 매우 중요한 도움을 줄 수 있다. 기존 지표화 등의 산불확산속도 예측은 실험에 기반을 둔 모델을 활용하였다.

열전달 해석에 기반을 둔 화염의 전파속도를 산정하는 수치해석에 대한 모델식과 알고리즘개발에 대해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 산불 지표화 1차원 화염전파 수치해석을 기반으로 한 알고리즘 및 프로그램을 개발하였다.
- 2) 지표화에 대한 실험값 및 다른 모델식과의 확산 예측 ROS 비교결과, 풍속 3 m/s 이하 조건에서의 지표화 확산속도에서는 지수함수식의 증가곡선의 경향을 나타내었다.
- 3) 소나무 침엽수 지표낙엽연료에 대하여 실험값과의 비교한 결과, 풍속 1-2 m/s 조건에서는 확산속도가 약 10% 상향예측이 되었고 풍속 3 m/s 조건에서는 약 20% 하향예측 되었다.

기호설명

- ROS : rate of spread(mm/s or km/hr)
- M_c : fuel moisture content (%)
- Q : heat release rate(kW)
- H_c : the heat of combustion(kJ/kg)
- \dot{m}'' : the mass loss rate per unit area(kg/m²)
- D : flame depth(m)
- Δh : the difference in thermal enthalpy per unit mass between the fuel at its ignition and the

- virgin fuel(J/g)
- H_0 : no wind flame height(m)
- H : wind added flame height(m)
- u_0 : wind speed(m/s)
- g : gravitational acceleration(m/s²)
- F_n : view factor
- \dot{q}'' : heat flux(kW/m²)
- \dot{q}_r'' : radiative heat flux(kW/m²)
- ϵ : emissivity
- σ : Stefan-Boltzmann constant
- ρ : fuel density(kg/m³)
- c : specific heat(J/kg°C)
- δ : fuel layer tick(m)
- T_{ig} : ignition temperature(°C)
- T_f : flame temperature(°C)
- T_∞ : virgin material temperature(°C)
- : per unit time
- ' : per unit length
- " : per unit area

참고문헌

1. 김동현, 김태구, 김광일, “산림화재 종합위험등급화에 관한 연구”, 한국화재소방학회논문지, Vol.15, No.3 pp.49-54(2001).
2. 김동현, 이명보, 강영호, 이시영, “지표물질 착화성 실험을 통한 발화위험성 분석”, 2006 한국방재학회 학술발표대회 논문집, pp.379-384(2006).
3. D.H. Kim, “Forest Fire Risk Assessment through Analyzing Ignition Characteristics of Forest Fuel Bed”, V International Conference on Forest Fire Research, pp.30-31(2006).
4. 박형주, 김응식, 김장환, 김동현, “복사열을 이용한 소나무와 굴참나무 낙엽의 연소특성 분석”, 한국화재소방학회논문지, Vol.21. No.3, pp.33-41(2007).
5. 이명보, 김동현 외, 소방방재청 자연재해기술개발사업 “산불피해저감을 위한 진화기술 개발”, 연구보고서, p.132(2007).
6. 김장환, 김응식, 김동현, 이명보, “소나무 및 굴참나무 낙엽의 연소특성 분석”, 산림과학논문집, Vol.69, pp.98-103(2006).
7. 이병두, 정주상, 이명보, 김동현, “산불확산예측모델의 개발”, 한국화재소방학회 2006년도 춘계학술논문 발표회 논문집, pp.231-235(2006).
8. 박병현, 박덕신, 조영민, 박은영, 이철규, “콘칼로리미터를 이용한 바이오매스의 연소특성에 관한 연구(I)-단풍잎, 은행잎, 덩굴, 솔잎에 대해서-”, 한국대기환경학회지, Vol.21, No.4, pp.459-469(2005).

9. K. Himoto and T. Tanaka, "A Burning Model for Charring Materials and Its Application to the Compartment Fire Development", *Fire Science and Technology*, Vol.23, No.3, pp.170-190(2004).
10. F.A. Albini, "A Physical Model for Fire Spread in Brush. In "11th Symp.(Int.) on Combust", The Combustion Institute, Pittsburgh, pp.553-560(1967).
11. F.A. Albini, "Estimating Wildfire Behavior and Effects", Technical Report USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. INT-30, USDA Forest Service(1976).
12. F.A. Albini, "A Model for the Wind-Blown Flame from a Line Fire", *Combust. Flame* 43, p.155(1981).
13. F.A. Williams, "Mechanisms of Fire Spread(Invited Review)", in 16th Symposium(Int.) on Combustion, Combustion Institute, Pittsburgh, PA, pp.1281-1294 (1976).
14. H.E. Anderson, "Sundance Fire: An Analysis of Fire Phenomena", Res. Pap. INT-56, USDA Forest Service, Ogden(1968).
15. H.E. Anderson, "Heat Transfer and Fire Spread", Res. Pap. INT-69, USDA Forest Service, Ogden (1969).
16. R.C. Rothermel, "A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuel", Res. Pap. INT-115, USDA Forest Service, Ogden(1972).
17. K.G. Hirsch, "Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System: User's Guide", Technical Report Special Report 7, Canadian Forest Service, Northwest Region, Northern Forestry Centre p.122 (1996).
18. M. Nelson and C.W. Adkins, "Flame Characteristics of Wind-Driven Surface Fires", *Canadian J. Forest Res.*, Vol.16, p.1293(1986).
19. G.M. Byram, "Combustion of Forest Fuels, Forest Fire: Control and Use", edited by K.P. Davis (McGraw-Hill, New York), p.61(1959).
20. P.H. Thomas, "The Size of Flames from Natural Fires", in Proceedings of the 9th Symposium (International) on Combustion (The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, pp.844-859(1963).
21. A. Putnam, "A Model Study of Wind-Blown Free-Burning Fires", in Proceedings of the 10th Symposium (International) on Combustion (The Combustion Institute, Pittsburgh, PA), pp.1039-1046(1965).
22. B. Fang, "An Investigation of the Effect of Controlled Wind on the Rate of Fire Spread", Ph.D. Dissertation, University of New-Brunswick(1969).
23. I.R. Nobel, G.A.V. Bary and A.M. Gill, "McArthur's Fire-Danger Meters Expressed as Equations. *Australian J. of Ecology*", Vol.5, pp.201-203(1980).
24. T. Beer, "The Interaction of Wind and Fire", *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.54, pp.287-308 (1991).
25. F. Tamanini, "Comb. and Flame", Vol.60, p.219 (1985).
26. M. William, J. Charney, M.A. Jenkins, P. Cheney and J. Gould, "Numerical Simulations of Grassland Fire Behavior from the LANL-FIRETEC and NIST-WFDS Models", EastFIRE Conference(2005).
27. N.P. Cheney and J.S. Gould, "Fire Growth in Grassland Fuels", *International Journal of Wildland Fire*, Vol.5, No.4, pp.237-247(1995).
28. N.P. Cheney, J.S. Gould and W.R. Catchpole, "Prediction of Fire Spread in Grasslands", *International Journal of Wildland Fire*", Vol.8, No.1, pp.1-13(1998).
29. B. McCaffrey, *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 2nd ed., Society of Fire Protection Engineers and National Fire Protection Association, Quincy, MA(1995).
30. G. Heskestad, *Fire Safety Science-Proceedings of the Fifth International Symposium*, International Association for Fire Safety Science(1998).
31. NFPA & SFPE, "The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", 3rd edition, pp.247-251 (2002).